

简缩极化 GNSS-ReSAR 陆面遥感技术研究

摘要：全球导航卫星系统反射测量技术（Global Navigation Satellite System Reflectometry, GNSS-R）是一种通过解析导航卫星反射信号实现地表参数反演的有效对地观测手段。历史研究表明,传统 GNSS-R 系统主要采用单一极化配置(右旋圆极化(RHCP)发射与左旋圆极化(LHCP)接收,下文简称 LR 极化),对其他极化组合的散射特性研究相对薄弱。随着技术进步,采用 RHCP 天线接收地表反射信号的方案逐渐受到重视。同时,传统 GNSS-R 的时延多普勒图(Delay-Doppler Map, DDM)处理模式在不同观测几何条件下对散射特征的利用效率较低。在此背景下,发展能够跨几何构型有效接收地表散射信号的 GNSS 合成孔径雷达(GNSS-based Synthetic Aperture Radar, GNSS-SAR)技术成为具有潜力的研究方向。本研究聚焦简缩极化 GNSS-R 与合成孔径雷达融合技术(GNSS-ReSAR: GNSS-Reflectometry and Synthetic Aperture Radar)的遥感探索。基于西班牙机载 GLORI 实验获取的双极化(LR 及 RR(RHCP 发射与 RHCP 接收))数据开展了土壤水分反演研究,并同步利用中国天目(TM)商业卫星的双极化 GNSS-R 数据进行对比验证。两项实验一致表明,RR 极化反射率较 LR 极化低约 10 dB,但基于两种极化反演的土壤水分精度具有可比性。受限于简缩极化数据获取能力,本研究采用基于辐射传输理论构建的 LAGRS(Land Surface GNSS Reflection Simulator)模型解析简缩极化的其他散射特性。通过系统分析 GNSS-ReSAR 模式的散射机制与发展趋势,为新一代 GNSS-R 技术演进在一定程度上提供了理论参考。

关键词：GNSS-R; 简缩极化; DDM; SAR

中图分类号：TP208

文献标识码：A

收稿日期：****-**-**

DOI：10.13203/j.whugis*****

文章编号：

Research on Simplified Polarized GNSS ReSAR Land Surface Remote Sensing Technology

Abstract: 【本刊最新格式要求英文摘要中明确标出 4 个部分：Objectives, Methods, Results, Conclusions, 综述可不依此格式】 **Objectives:** Conventional Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS-R) primarily relies on single-polarization, presenting key limitations. The research explores compact polarimetry potential by integrating GNSS-R and Synthetic Aperture Radar (SAR) techniques (GNSS-ReSAR), aiming to enhance soil moisture retrieval accuracy and expand observable land surface parameters. **Methods:** Dual-polarization datasets from Spain's airborne GLORI experiment (LR, RR) and China's Tianmu satellite constellation were analyzed. A neural network incorporating coherent/non-coherent scattering components and auxiliary parameters (incident angle, roughness, leaf area index) was developed for soil moisture inversion. The Land surface GNSS Reflection Simulator (LAGRS) model characterized compact polarization scattering under varying geometries. Polarimetric ratio analysis and Stokes parameter synthesis resolved discrepancies between theoretical predictions and observed RR polarization characteristics. **Results:** Soil moisture retrieval accuracy was comparable between RR and LR polarizations (RMSE: 0.0342–0.0681 RR vs. 0.0320–0.0700 LR), despite RR reflectivity being 5–10 dB lower. GLORI data showed non-coherent scattering contributed 15%–40% of total power; its inclusion with geometric/biophysical parameters improved RMSE from 0.0853 to 0.0348. Tianmu observations confirmed polarization-dependent reflectivity distributions (bare soil: -45 to 0 dB LR vs. -45 to -20 dB RR; vegetation cover), with normalized trends contradicting Fresnel predictions.

LAGRS simulations revealed significant azimuthal variations ($>70^\circ$) in compact polarization scattering, necessitating GNSS-SAR integration for multi-angle feature extraction. **Conclusions:** RR polarization demonstrates operational feasibility for soil moisture monitoring. Compact polarimetry represents a transformative enhancement to GNSS-R. The GNSS-ReSAR framework synergistically utilizes polarization diversity and multi-angle scattering, addressing Delay-Doppler Map position ambiguity. Findings provide foundations for optimizing next-gen GNSS-R payloads (polarization-agile receivers, geometry-aware algorithms). Dual-polarization measurements and model-driven Stokes synthesis advance autonomous geophysical parameter retrieval without ancillary satellite data.

Key words: GNSS-R, Simplified polarization, DDM, SAR

1 简介

微波遥感具备全天时全天候工作能力，GNSS-R 作为有别于辐射计和雷达的新型微波遥感手段，逐渐成为该领域的研究热点，其极化特性研究更是区别于传统辐射计和雷达的关键内容。与传统微波遥感中的线极化不同，导航卫星发射的为右旋圆极化（Right-Hand Circular Polarization, RHCP）信号^[1]。在 GNSS-R 研究中，早期研究普遍采用左旋圆极化（Left-Hand Circular Polarization, LHCP）接收机天线以隔离直射信号干扰^[1-3]。

在机载实验方面（如表 1），早期的 SMEX（soil moisture field experiment）02 与 03 实验中采用美国宇航局兰利研究中心研制的名为延迟映射接收器（DMR）的 GPS 双站雷达接收机。其独立的射频前端分别连接指向天顶的右旋圆极化（RHCP）天线（用于接收直射信号）和指向天底的左旋圆极化（LHCP）L1 频段天线（用于接收地表反射信号）^[4]，该实验为首次利用 LR 极化的反射率进行地表土壤水分研究的成果，并取得良好的定性分析结果。随后 ESA 的 LEiMON（LAnd Monintoring with Navigation Signal）实验也采用单极化（LHCP 极化天线）进行土壤水分相关研究。BAO（Boulder Atmospheric Observatory）塔实验^[5]和加泰罗尼亚理工大学（UPC Universitat Politècnica de Catalunya Barelona Tech）的相关实验均不再拘泥于 LHCP 极化接收机天线^[6]，开始尝试利用其他极化天线接收机地表散射信息，进而提高地表土壤水分反演精度。其中 SMIGOL 反射计系统通过接收 GNSS 直射与反射信号获取相干波形（IPT Interference Pattern Technique）信息，其配置的垂直与水平极化天线可测量对应极化状态下的干涉图样，通过分析波形中凹槽的数量与位置信息实现地球物理参数反演；SMEX02/03 实验之后的 BAO 塔实验^[5]于 2002 年夏秋季进行，采用 NASA 兰利研究中心提供的改进的 DMR 接收机。其中右旋圆极化（RHCP）天线用于跟踪直射信号，地表观测天线系统包含：(a) 低增益半球形左旋圆极化（LHCP）天线；(b) 四个端射高增益（约 12 dB）的垂直极化（V）、水平极化（H）、左旋圆极化（LHCP）和右旋圆极化（RHCP）天线。实验设计之初是为了利用四种极化信息削弱土壤粗糙度和植被的影响，进而提高土壤水分反演的精度，但是实验的相关结论却因模型假设过度简化，导致实验结果与理论预期存在偏差^[5]；近年来，双极化机载实验成为星载双极化 GNSS-R 接收机的预研热点，西班牙的 GLORI 实验^[7]是首个公开提供完整双极化反射率观测数据集的实验，该实验数据同时量化了非相干分量在总散射信号中的占比特征；自 2022 年 10 月持续至今的 RONGOWAI(GLObal Navigation Satellite System Reflectometry Instrument)机载实验^[8]，核心科学目标是通过极化 GNSS-R 测量（RHCP/LHCP 双极化联合观测），提升茂密植被覆盖下内陆水域的探测能力。

表.1 机载 GNSS-R 实验及天线极化特性
Tab.1 Airborne GNSS-R experiment and antenna polarization characteristics

实验名称	SMEX02/03	BAO 塔实验	UPC GNSS-R	LEiMON	GLORI	RONGOWAI
接收机	DMR	DMR	SMIGOL/PMIGOL (机载)	SAM	新型接收器	NGRx
日期	2002~2003 年	2002 年	2008~2012 年	2009 年 3 月 ~2009 年 9 月	2021 年夏	2022 年 10 月~至今
研发机构	NASA	NASA	UPC	ESA	ESA	NASA
反射天线极化类型	LHCP	LHCP/RHCP /H/V	H/V	RHCP/LHC P	RHCP/LH CP	RHCP/LHCP

Egido 等人借助机载极化测量技术开展三项实验，同步采集 RR 与 LR 反射数据，发现低入射角条件下，土壤水分和地表粗糙度对 RR、LR 反射率影响显著。通过分析极化比可知，其对中等粗糙度地表敏感度较低，利于土壤水分反演；当粗糙度超 3 厘米时，非相干散射成为主导因素。后续研究采用四通道样机深入分析 RHCP/LHCP 双极化反射特性，在数据处理中重点剔除非相干反射能量干扰，最终证实极化比是土壤水分反演的有效技术手段^[9]。

在星载 GNSS-R 载荷设计中(如图 1)，早期的 UK-DMC(United Kingdom-Disaster Monitor Constellation)，TDS-1(TechDemoSat)、CYGNSS(Cyclone Global Navigation satellite System)等卫星采用 LHCP 天线接收海洋/陆地反射信号^[10-12]，而 ESA 的 HydroGNSS 卫星和商业 Muon 卫星、中国商业天目(TM)卫星及陆地水资源卫星则配备双极化(RHCP 和 LHCP)GNSS-R 接收载荷^[13,14]。针对北斗 GNSS 散射信号遥感，发射源的极化状态确定为 RHCP，接收机的极化状态任意变换，则组成了典型的简缩极化模式，目前以 SMAP-R 为数据源，JPL 团队的相关人员开展了简缩极化的地表遥感探测功能研究，通过 Stokes 参数获取 RR、LR、VR、HR 数据开展遥感研究^[15]。但由于 SMAP-R(Soil Moisture Active and Passive-Reflectometry)是由于接收机中雷达部分的损坏而切换设计为接收 GNSS 反射信号模式，因此目前国内外尚未有专门针对北斗 GNSS 散射信号而设计的简缩极化接收机。本文将从机载和星载实验分析双极化的研究成果，并从机理模型方面分析简缩极化的特性。值得注意的是，为了陆地表面以土壤水分为主的水循环参数的有效反演，在机载 GLORI 实验和 HydroGNSS 的设计中，都加入了非相干散射特性的获取研究，其目的之一是为了利用除镜像反射以外的非相干散射进行地物参数反演。

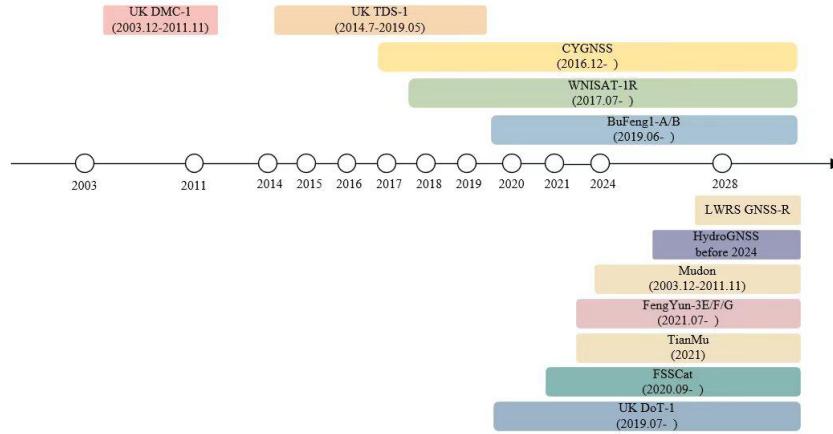


图 1 星载 GNSS-R 发展历程图
Fig.1 Development history chart of spaceborne GNSS-R

在机理模型研究方面，对陆地表面参数的北斗 GNSS 散射特性及其物理机制的精确表征与机理解析，是支撑卫星观测数据解译与建模、多源数据同化融合、地表参数定量反演算法开发以及新型星载传感器优化设计的核心理论基石。目前面向 GNSS-R 陆地表面散射特性科学研究的物理模型主要有 SARVERS 模型^[16], Scobi-Veg 模型^[17]和 LAGRS 模型等^[18-20]。SAVERS(Soil And VEgetation Reflection Simulator)模型集成几何、延迟-多普勒图 (DDM) 和散射系数计算模块，采用裸土/植被覆盖土壤电磁模型，在极化处理中考虑实际天线极化、失配及串扰效应。该模型在 LR 极化和低入射角条件下能较准确模拟地面情况，但对 RR 极化信号的预测精度仍需提升^[16]。Scobi-Veg(Signals of opportunity Coherent Bistatic scattering model for Vegetation)模型关注双极化在相干/非相干散射中的特性，发现镜像反射低入射角时 LR 极化反射率高于 RR 极化，且二者随入射角变化趋势相异，植被对 RR 极化反射率影响显著；漫散射情况下，极化特征受散射机制主导，双次散射贡献最大，LR 极化归一化雷达散射截面响应随入射角先升后降^[17]。陆地表面全极化 GNSS-R 模型 LAGRS 系统，基于微波辐射传输方程和极化合成方法，可计算镜像/非镜像条件下包含简缩极化在内的散射特性，模拟结果表明地物参数的 GNSS 散射特性受散射天顶角和方位角影响显著，直接关系反演精度^[18-20]，该模型在 CYGNSS 和风云 GNOS-R(GNSS occultation sounder II-reflectometry)的土壤水分反演中作为辅助理论支撑了反演算法的开发^[21]，其双极化散射特性的研究也在一定程度上助力了中国计划 2028 年发射的陆地水循环卫星的双极化 GNSS-R 载荷的论证。

GNSS-R 的传统应用中常采用沿轨迹扫描形成 DDM(时延多普勒图 Delay Doppler Map)波形，陆地表面研究多以镜像点位置的 DDM 最大值（有效反射率 SR(Effective Surface reflectivity)值）作为反演依据^[22,23]。但 DDM 波形每个网格对应两个位置，存在位置模糊问题。虽有学者尝试多星定位解决，但当前仅利用网格最大值反演，未充分挖掘 DDM 数据潜

力。尽管有研究采用多个时延多普勒网格作为非相干数据进行反演，却因位置模糊导致观测几何信息无法有效分离，尚未真正利用观测几何的散射特性进行反演^[24]，但研究却对未来 GNSS-R 发展具有一定的指向性意义。表 2 总结了星载 GNSS-R 的发展历程，最初的第一代 GNSS-R 载荷（UK-DMC，TDS-1）有效验证 LR 极化地表反射信号可以被接收，第二代 GNSS-R 载荷表明（NASA CYGNSS，风云卫星的 GNOS-R，Spire GNSS-R）LR 极化散射特性信息可以进行反演，但反演算法依赖于现有 SMAP 等卫星数据，因此在第三代（ESA HydroGNSS，中国陆地水资源卫星和天目商业卫星的 GNSS-R 载荷中均增加了双极化信息以期消除地表粗糙度和植被影响，以期开发出土壤水分的独立反演算法。上述 GNSS-R 中均采用 DDM 为观测量，在土壤水分反演方法中，以提取镜像点反射率为主，而且由于 DDM 数据格式本身的限制，尚未有效挖掘其他观测几何（不同散射天顶角/方位角）下的双站雷达散射特性，因为将 GNSS 卫星群作为信号源，在保留原有的 DDM 模式情况下，挖掘不同观测几何下的简缩极化散射特性信息，将有助于后期陆地表面其他诸如植被生物量，地表冻融等地物参数目标信息的有效挖掘，因此在第四代 GNSS-R 设计中，研制简缩极化 GNSS-ReSAR（GNSS-Reflectometry and GNSS-SAR）模式的相关接收机成为一个潜在的研究内容，其中 GNSS-Re 指的是传统的 DDM 模式，GNSS-SAR 则是可以分离不同观测几何下散射特性的双站或多站雷达模式，利用 GNSS-ReSAR 模式有效挖掘 GNSS 电磁波直射信号经地表散射的极化信息（简缩极化）和不同观测几何的散射特性信息，将会为获取更多陆地物参数的敏感性配置和相应反演算法开发提供一定的可行性^[25]。

表 2 星载 GNSS-R 发展历程简表
Tab.2 Summary of the Development History of Spaceborne GNSS-R

代际	代表性天基载荷	数据特点	简要结论
GNSS-R V1.0	英国 UK-DMC 英国 TDS-1	DDM 数据；单极化（LR 极化）	星载 GNSS-R 载荷在单极化天线配置下可以有效接收陆地表面的反射信号；
GNSS-R V2.0	NASA CYGNSS 中国风云卫星 GNOS-R 美国 Spire GNSS-R	DDM 数据；单极化（LR 极化）	利用单极（LR 极化）的镜面反射点的有效反射率信息可以反演典型陆地表面水循环参数；但反演算法依赖于现有 SMAP 等卫星数据；
GNSS-R V3.0	ESA HydroGNSS 中国陆地水资源卫星 GNSS-R 载荷	DDM 数据；双极化（LR 极化和 RR 极化）	RR 极化的反射率可以被接收和利用，利用双极化（LR 和 RR 极化）散射特性，预期可以消除地表粗糙度和植被参数的影响，

中国天目商业卫星

降低对外部数据的依赖；

GNSS-R 载荷（12 号-21

号卫星）

GNSS-R

GNSS-ReSAR

DDM 数据+SAR 数据模式；

利用 LR，RR，VR 和 HR 等简缩极化在不

V4.0

简缩极化在不同观测几何下的双站

同观测几何下的散射特性拟获取不同地物

雷达散射截面；

参数的敏感性配置参数并发展建立独立的

反演算法。

本文在第二部分将以西班牙机载 GLORI 数据、中国天目商业卫星数据为例，分析双极化的数据特性及反演结果；在实验数据相对欠缺的情况下，文章中第三部分将利用机理模型分析简缩极化特性和观测几何的影响。

2 双极化数据特性及反演效果分析

2.1 机载 GLORI 实验数据

2021 年夏天的 GLORI 机载实验是针对 ESA 计划于 2025 年发射的 HydroGNSS 以及其他极化 GNSS-R 卫星观测计划的预研实验^[26]。该实验是在全球环境能量与水分交换项目（GEWEX-supported LIAISE international project）的支持下开展的。实验利用双极化全球导航卫星系统反射计（GNSS-R）技术，监测和分析西班牙东北部埃布罗流域，特别是乌赫尔农业区的土壤湿度、地表粗糙度和植被状况。研究的核心是利用安装在 ATR-42 飞机上的 GLORI（全球导航卫星系统反射计）仪器收集 GNSS-R 航空数据。该实验是首个机载双极化实验，同时包含了相干反射率和非相干反射率比值的观测。这些数据与地面真实数据和土地利用数据相结合，用于评估双极化的特性和非相干散射的能量强度。实验收集的数据集预期目标之一是为电磁建模研究提供宝贵的数据资源，并可以用于验证相关的相干和非相干散射模型。

2.1.1 GLORI 数据双极化特性分析

GLORI 机载飞行试验区土地类型较为丰富，包括苜蓿种植地、果园（苹果和梨树）、玉米地和收割后的小麦地^[26]。

计算反射率(γ)时，利用基于干涉复数场(ICF)的方法。ICF 定义为反射波形峰值时间序列与直接波形峰值时间序列的比值，计算公式为^[26]：

$$ICF_{corr} = \frac{|Y_{r,max}| - noise_{fix}}{|Y_{d,max}| - noise_{fix}} e^{i(\varphi_{r,max} - \varphi_{d,max})} \frac{G_d}{G_r} \quad (1)$$

其中 $noise_{fix}$ 为仪器噪声 ($noise_{fix} = noise_{1ms} / t_{coh}$, $noise_{1ms}$ 为 $1ms$ 的经验噪声值, t_{coh} 为相干积分时间), G_d 是直接通道天线增益, G_r 是反射通道天线增益, $\varphi_{r,max}$ 和 $\varphi_{d,max}$ 分别是反射和直接波形峰值的相位, $|Y_{r,max}|$ 和 $|Y_{d,max}|$ 分别是反射和直接波形峰值的模。

然后从 ICF 中消除非相干贡献来估计反射率 Γ_p , 公式为:

$$\Gamma_p = \left\langle |ICE_{p,corr}|^2 \right\rangle - \sigma_{ICE_{p,corr}}^2 \quad (2)$$

其中 $\sigma_{ICF_{\mu,corr}}^2$ 是 ICF 在非相干平均周期 (200ms) 内的方差, p 代表极化 (右或左)。在 L1b 数据集中, Γ_l 和 Γ_r 分别作为 gamma_l 和 gamma_r 变量提供。

为估计非相干分量相对于总散射功率的百分比 (非相干比 α_p), 计算公式为^[26]:

$$\alpha_p = \frac{\sigma_{ICE_{p,corr}}^2}{\left\langle |ICE_{p,corr}|^2 \right\rangle} \quad (3)$$

在 L1b 数据集中, α_l 和 α_r 分别作为 incoherent_ratio_l 和 incoherent_ratio_r 变量提供。

2.1.2 GLORI 数据双极化数据反演结果

表 3 是结合神经网络方法, 利用 LR 极化的相干和非相干散射进行反演的结果^[27]。在利用相干散射部分进行反演时, 当只考虑 LR 极化的有效反射率 SR_{LR} 和分别增加镜像入射角 θ , 均方根高度 rms 和叶面积指数 LAI 作为神经网络的训练层时, 对应的反演精度 RMSE 从 0.0700 增加至 0.0650, 0.0468 和 0.0320。利用 LR 极化的非相干散射特性进行作为神经网络的训练层进行反演时, 反演精度的 RMSE 为 0.0821, 当神经网络训练层输入分别加入 GLORI 辅助观测中的观测几何 (θ) 和地物物理参数 (均方根高度 rms 和叶面积指数 LAI 时), 对应的反演精度 RMSE 从 0.0728 增加至 0.0422 和 0.0293。因此可见, 当考虑使用 LR 极化的非相干散射进行反演时, 也可以达到与 LR 极化相干散射近似的反演精度。

表 3 机载 GLORI 数据 LR 极化相干和非相干土壤水分反演结果

Tab.1 Source Parameters of the 2022 Luding Mw 6.6 Earthquake			
RR polarization	Case 1	SR _{LR}	0.0700
	Case 2	SR _{LR} ;θ	0.0650
	Case 3	SR _{LR} ;θ;rms	0.0468
	Case 4	SR _{LR} ;θ;rms;LAI	0.0320
RR polarization	Case 1	NonCohSR _{LR}	0.0821
	Case 2	NonCohSLR _R ;θ	0.0728
	Case 3	NonCohSLR _R ;θ;rms	0.0422
	Case 4	NonCohSLR _R ;θ;rms;LAI	0.0293

针对 RR 极化，文章中^[27]首次利用其进行了土壤水分反演，其中当使用 RR 极化相干散射进行反演时候，反演精度的 RMSE 为 0.0681，当考虑增加镜像入射角 θ ，均方根高度 rms 和叶面积指数 LAI 时，对应的反演精度 RMSE 分别为 0.0650,0.0402 和 0.0342。在采用 RR 极化非相干散射进行反演时，反演精度为 RMSE0.0853，比对应的相干散射反演精度低，但当增加辅助观测数据（入射角 θ ，均方根高度 rms 和叶面积指数 LAI 时），反演精度提升至 RMSE 分别为 0.0741,0.0569 和 0.0348,与对应的 RR 极化相干散射特性反演的精度相对比，略低，但是均在可接受范围内。因此该文中^[27]首次证实了 RR 极化是可以用来进行土壤水分反演的，同时也证明了在 LR 极化和 RR 极化时，非相干散射能量也可以用来进行土壤水分反演，反演精度略低于对应的相干散射的反演精度，但二者均在土壤湿度反演可接受的精度范围内。

表 4 机载 GLORI 数据 RR 极化相干和非相干土壤水分反演结果

Tab.1 Source Parameters of the 2022 Luding Mw 6.6 Earthquake			
RR polarization	Case 1	SR _{RR}	0.0681
	Case 2	SR _{RR} ;θ	0.0650
	Case 3	SR _{RR} ;θ;rms	0.0402
	Case 4	SR _{RR} ;θ;rms;LAI	0.0342
RR polarization	Case 1	NonCohSR _{RR}	0.0853
	Case 2	NonCohSR _{RR} ;θ	0.0741
	Case 3	NonCohSR _{RR} ;θ;rms	0.0569
	Case 4	NonCohSR _{RR} ;θ;rms;LAI	0.0348

2.2 星载天目数据

天目商业卫星星座由中国航天天目（重庆）卫星科技有限公司自主建设，该星座系统基于北斗/GNSS 遥感技术，开展北斗/GNSS 掩星探测和 GNSS 反射遥感（GNSS-R）探测，星座兼容接收北斗、GPS、GALILEO、GLONASS 四大导航系统信号。目前，天目一号星座共 23 颗卫星在轨稳定运行，数据已实时推送中国气象局。该星座系统于 2023 年 12 月发射了实验 GNSS-R 双极化卫星，是国际上首个双极化星载 GNSS-R 卫载荷。本文将采用 2023 年 12 月以来的双极化星载 GNSS-R 数据反演土壤水分。

2.2.1 天目双极化数据特性分析

天目卫星的 GNSS-R 载荷研制单位与风云系列卫星上（Fengyun E/F/G）的 GNSS-R 载荷(GNOS-R)研制单位相同,在数据格式的设计上完全一致。利用 GNSS-R 数据进行反演时，假定接收到的是镜像反射，则镜像角度下有效反射率计算方法如下^[21]：

$$\Gamma(\theta) = \frac{(R_r + R_t)^2 (P_{DDM} - N)}{FR_t^2 R_r^2 4\pi} \quad (4)$$

其中 Γ 为有效反射率， R_r 和 R_t 分别为镜面反射点到接收机和发射机的距离， P_{DDM} 为 DDM 峰值功率， N 指噪声， F 为 DDM 双站雷达截面积因子。

$$F = \frac{\lambda^2 P_t G_t G_r}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \quad (5)$$

其中 $P_t G_t$ 为 GNSS 有效全向辐射功率（EIRP）， G_r 为接收天线方向图。

2.2.2 天目双极化 GNSS-R 数据分析

利用 2024 年 DOY071 天中天目 12 号双极化 GNSS-R 数据绘制的镜像反射点轨迹如图 2，图 2 中不同的颜色代表有效反射率（Surface reflectivity (SR)）的数值。子图 a 为单天单颗星 LR 极化的反射率，子图 b 为对应的 RR 极化反射率。通过两个图的对比可以看出星载 GNSS-R 中的 RR 极化的数据可以被接收，但其数量级要比 LR 极化的反射率低 5-10dB 左右。

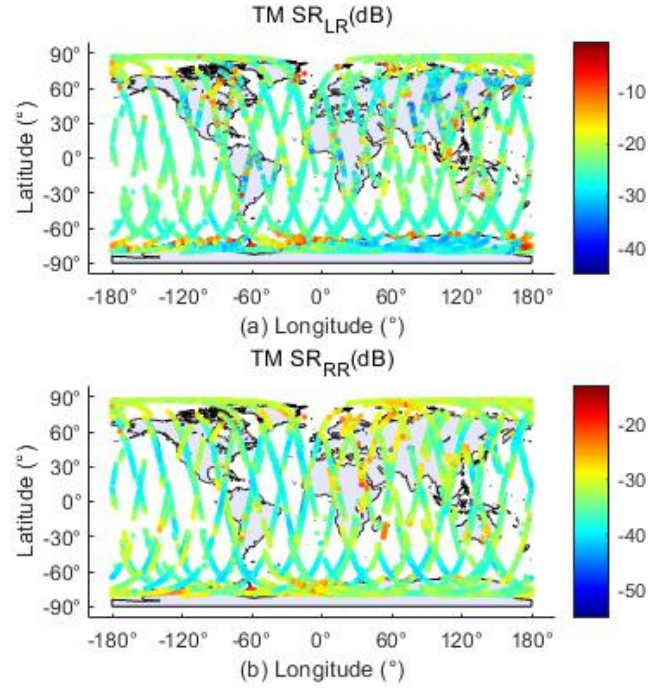


图 2 2024 年 DOY071 天目 12 号双极化 GNSS-R 载荷镜像反射点轨迹地图。(a)图 LR 极化, (b)图为 RR 极化
Fig.2 2024 DOY071 Tianmu 12 dual polarized GNSS-R payload mirror reflection point trajectory map. (a) Figure LR polarization, (b) shows RR polarization

利用全球土地利用与土地覆盖图将全球土地类型分为裸土区、低矮植被区和高大森林区。

图 3 是对单天 12 号卫星在三种土地类型中的有效反射率数值的直方图统计分析。(a)(b)(c) 分别为裸土区、低矮植被区和高大森林区 LR 和 RR 极化的有效反射率分布直方图, 从中可以看出 LR 极化的数值主要分布在 -45dB 至 0dB 之间, RR 极化的数值范围在 -45dB 至 -20dB 之间。裸土区和高大森林区域中 LR 极化和 RR 极化的直方图分布形态基本相同, 但是低矮植被区域中 LR 极化的直方图分布于 RR 极化直方图分布差别明显。

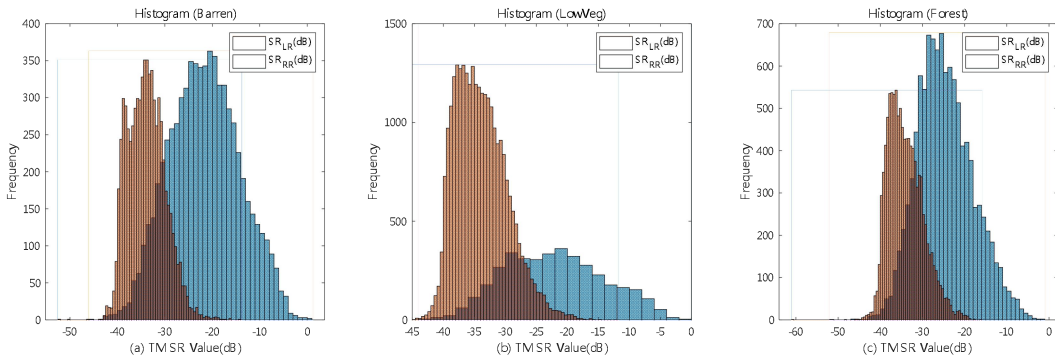


图 3 2024 年 DOY071 天目 12 号双极化 GNSS-R 载荷有效反射率分布直方图。(a)裸土区域有效反射率分布直方图 (b)低矮植被区域有效反射率分布直方图 (c)高大森林区域有效反射率分布直方图

Fig.3 Histogram of effective reflectance distribution of DOY071 Tianmu 12 dual polarized GNSS-R payload in 2024. (a) Histogram of effective reflectance distribution in bare soil area (b) Histogram of effective reflectance distribution in low vegetation area (c) Histogram of effective reflectance distribution in tall forest area

在天目 GNSS-R 卫星星座中，12 号至 22 号卫星均为双极化卫星。图 4 展示了 DOY 071 当天这 11 颗双极化卫星的 LR 和 RR 极化反射率分布情况。从该图可以看出，LR 极化主要分布在-45-0dB，RR 极化主要分布在-45--10dB。

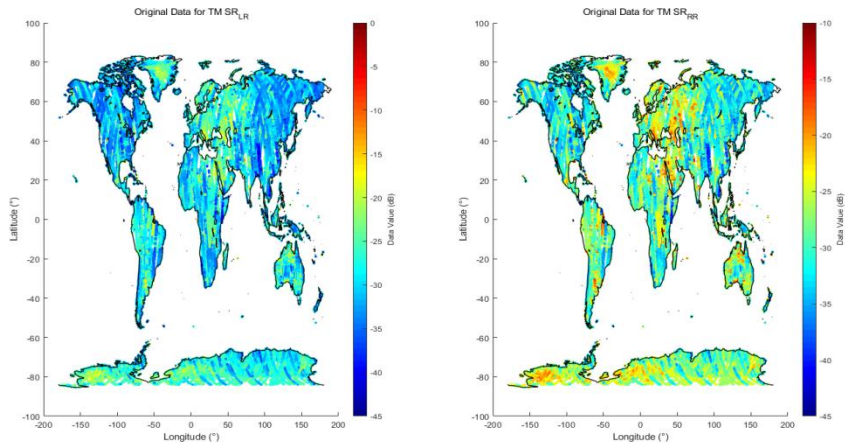


图 4 2024 年 DOY 071 天目双极化 GNSS-R 载荷 12 号至 22 号星有效反射率分布图。(a)LR 极化 (b)RR 极化
Fig.4 Distribution map of effective reflectance of DOY 071 dual polarized GNSS-R payloads 12-22 in 2024. (a) LR polarization (b) RR polarization

图 5 展示了对应的有效反射率分布直方图：(a)图为裸土区域两种极化的有效反射率直方图分布，(b)图为低矮植被区域两种极化的有效反射率直方图分布，(c)图为高大森林区域两种极化的有效反射率直方图分布。通过对 2024 年 DOY 071 这天 12 颗卫星的分析可知，LR 极化的有效反射率主要分布在-45 dB 至 0 dB 之间，而 RR 极化的有效反射率则集中在-45 dB 至-10 dB 之间。

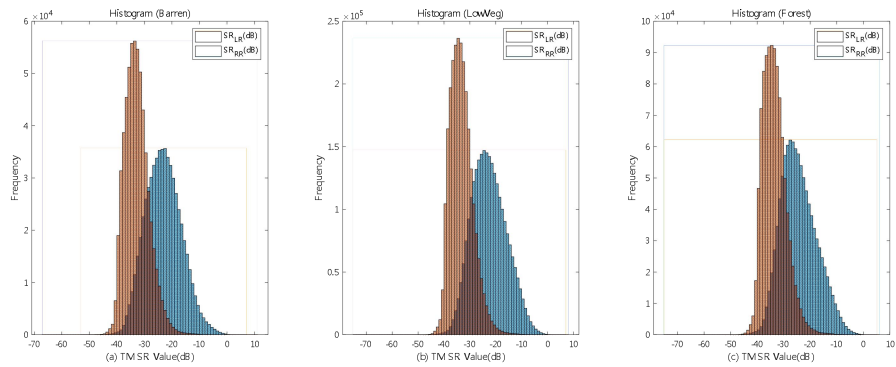


图 5 2024 年 DOY 071 天目双极化 GNSS-R 载荷 12 号至 22 号星有效反射率分布直方图
Fig.5 Histogram of effective reflectance distribution of DOY 071 dual polarized GNSS-R payloads 12-22 in 2024

图 6 展示了归一化后的数据。归一化的具体方法如下：首先，从陆地数据中提取前 20 个最大值和后 20 个最小值，分别计算其平均值作为最大值（max）和最小值（min）；对研

究区域中的每个数据点（data）进行归一化处理，得到对应的归一化有效反射率（data_normalized），具体公式如(6)。

$$data_normalized = \frac{data - min}{max - min} \quad (6)$$

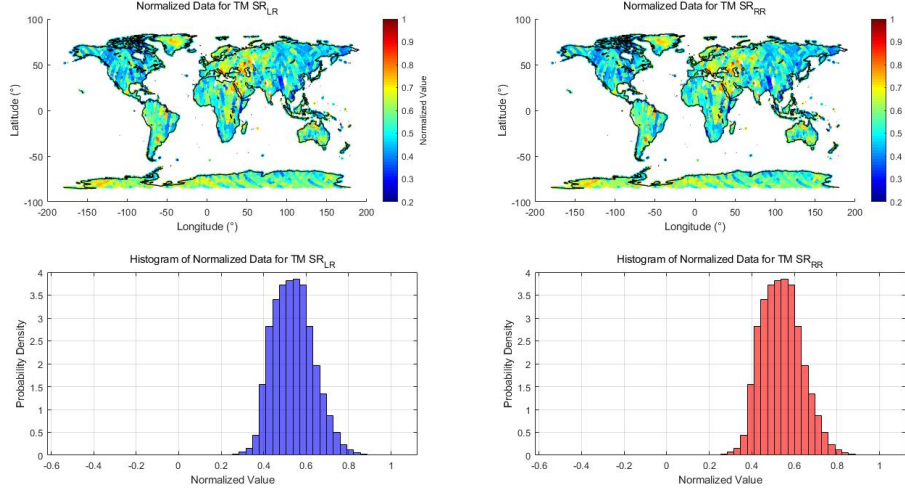


图 6 2024 年 DOY 071 天目双极化 GNSS-R 载荷 12 号至 22 号星归一化有效反射率分布图及直方图
Fig.6 Normalized effective reflectance distribution map and histogram of DOY 071 dual polarized GNSS-R payloads 12-22 in 2024

图 6 展示了归一化后的 LR(a)和 RR(b)极化的有效反射率分布图，可以看出 LR 极化和 RR 极化归一化后反射率分布趋势基本相同。在传统的 GNSS-R 遥感中 RR 极化的反射率计算公式如下：

$$r_h = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}} \quad (7)$$

$$r_v = \frac{\epsilon_r \cos \theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}}{\epsilon_r \cos \theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}} \quad (8)$$

其中 θ 为入射角， ϵ_r 为复介电常数，下标 h 和 v 表明极化状态。RR 极化的反射率如下[28]。

$$\Gamma_{rr} = \frac{1}{2}(r_{vv} + r_{hh}) = \frac{(\epsilon_r - 1)^2 \sin^4 \theta}{(\epsilon_r \sin \theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta})^2 (\cos \theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta})^2} \quad (9)$$

利用上述公式模拟的 RR 极化菲尼尔反射率随土壤水分变化的关系显示，在各种角度下，随着土壤水分的增加，RR 极化菲尼尔反射率都在降低。然而，LR 极化却呈现出相反的趋势[28,29]。但是，通过上述归一化的反射率图（图 6）可以观察到，实际上天目卫星观测的 LR

极化和 RR 极化有效反射率变化趋势是相同的，图(c)和图(d)中分别给出了对应的直方图分布情况，LR 极化和 RR 极化归一化反射率分布情况相同。而且 SMAP-R 的数据也同样证明 RR 极化反射率随着土壤水分增加而增加^[30]。因此，对于双极化 GNSS-R 卫星，采用传统的菲尼尔反射系数组合获取 RR 极化反射率进行后续数据分析和反演算法开发将存在一定的不适用性，因此亟待从机理模型角度出发进行 RR 极化散射特性计算的相关研究。

2.2.3 天目双极化 GNSS-R 数据反演

本研究基于 2024 年 DOY071 至 DOY181 期间的观测数据开展土壤水分反演研究。通过分析风云卫星 GNOS-R 载荷数据^[31]，发现观测角度对土壤水分反演精度具有显著影响。为此，本研究采用随机抽样方法，选取 80% 的样本数据，基于 AI 算法进行多角度训练，其中训练方法参照机载 GLORI 数据处理方案，并使用剩余 20% 数据作为验证集进行预测评估。基于 LR 极化和 RR 极化的双极化有效反射率的反演精度结果如图 7 所示，当 30° 至 40° 数据分成两部分（30° -34° 和 35° -40°）时，反演的结果 RMSE 是 0.056 和 0.053。当每隔一度进行反演时，对应的 RMSE 结果分别是 0.063，0.061，0.065，和 0.060。综合所有角度进行反演时候，最终反演结果的 RMSE 为 0.041。因此双极化的星载数据同样证明了利用其可以进行相应的土壤水分反演，得到的精度在可接受范围内。

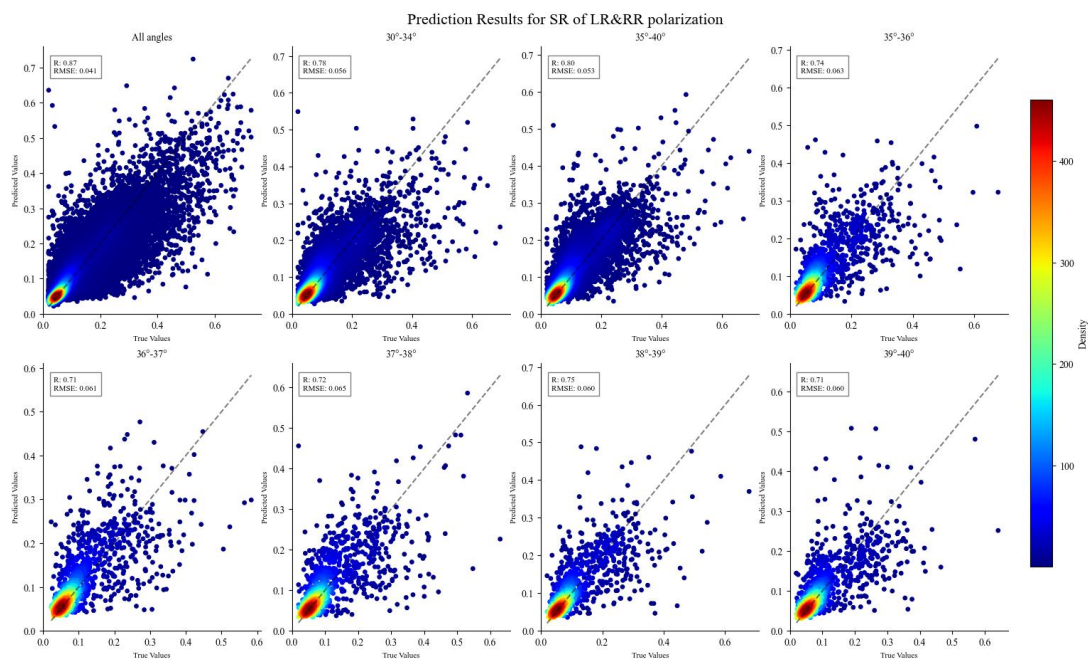


图 7 2024 年 DOY071 至 DOY181 天目双极化 GNSS-R 载荷 12 号至 22 号星反演土壤水分精度图
Fig.7 Accuracy map of soil moisture inversion using DOY071 to DOY181 dual polarized GNSS-R payloads from satellites 12 to 22 in 2024

3 简缩极化机理模型分析

与传统的 LHCP 接收地表反射信号，RHCP 的信号需要隔离的观点不同，机载 GLORI 和星载 TM 的数据均已证明来自地表的 RR 极化的反射率是可以被有效接收的；在利用水平极化和垂直极化的菲尼尔反射率线性组合获取 RR 极化菲尼尔反射率进行分析时，其与土壤水分的变化趋势与 LR 极化刚好相反，但是通过天目数据归一化及 SMAP-R 的数据研究发现 RR 极化随着土壤水分变化的趋势与 LR 极化相同^[30]，同时利用 RR 极化反射率可以取得 LR 极化相当的土壤水分反演精度；因此对应的 RR 极化机理模型亟待开展深入研究，同时增加极化信息，即分析其他简缩极化的北斗 GNSS 散射特性，在 GNSS-R 发展中将有助于不同地物参数的反演算法的开发，并将成为潜在的研究热点。但是受限于简缩极化观测数据，本文将机理模型为工具分析陆地表面简缩极化的北斗 GNSS 散射信号特性。

LAGRS 模型是一种专门针对陆地表面典型参数开发的 GNSS-R 散射模型，其理论基础融合了微波散射理论中的随机粗糙面散射模型和辐射传输方程模型。该模型系统集成了陆地表面水循环关键参数的子模型体系，主要包括：表征土壤特性的 LAGRS-Soil 模型、描述植被特征的 LAGRS-Veg 模型以及反映地表冻融状态的 LAGRS-FT 模型等^[18-20]。该模型的核心优势在于能够精确刻画导航卫星直射信号与地表参数相互作用后，被 GNSS-R 接收机捕获的复杂电磁散射物理过程。在实现方法上，该模型通过构建全极化散射矩阵，采用极化合成技术，并通过对缪勒矩阵中椭倾角和椭率角的参数化调整，实现了多种极化模式下散射特征的计算。

LAGRS 模型的流程图如图 8 所示。

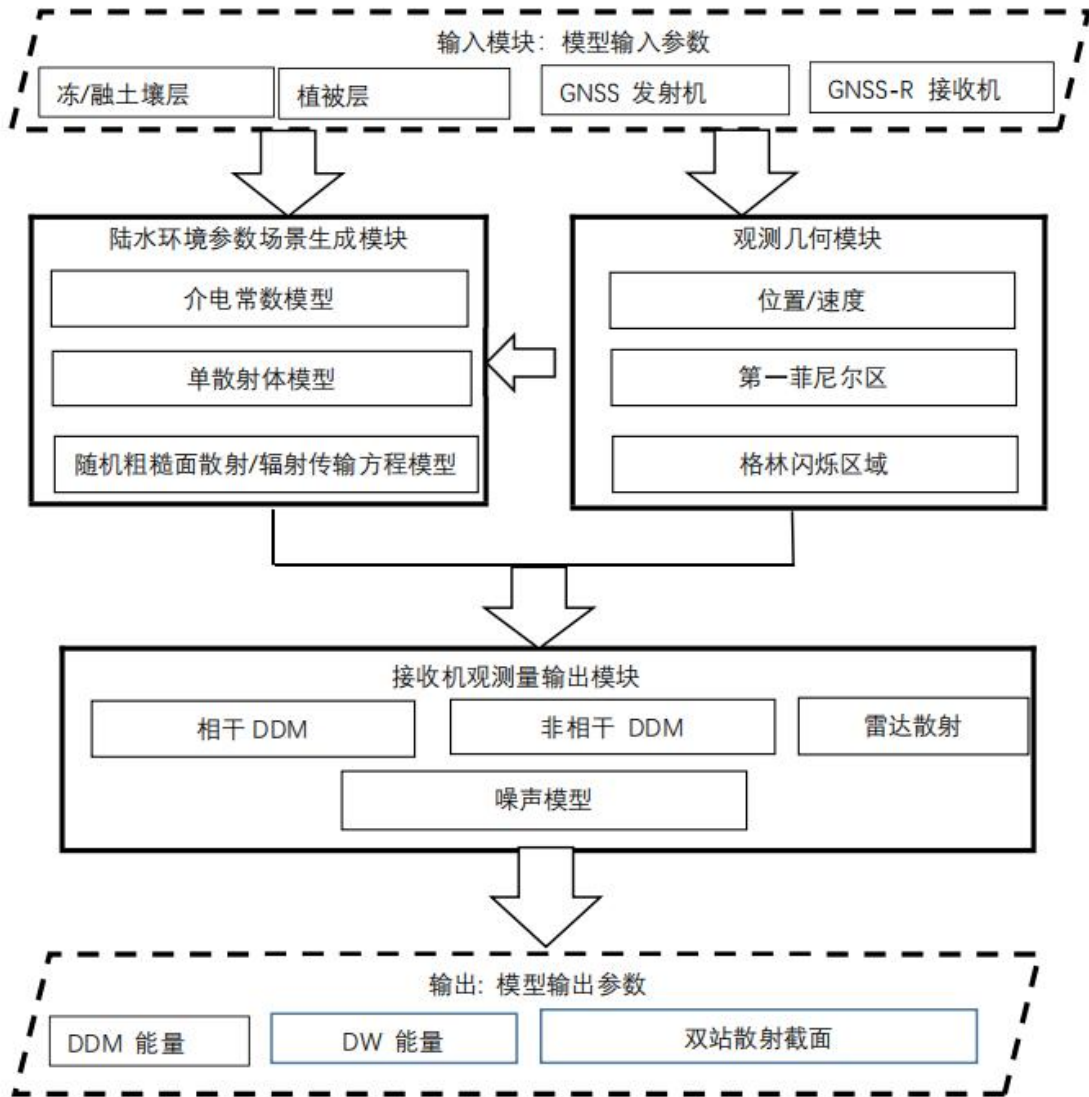


图 8 LAGRS 模型示意图
Fig.8 LAGRS model schematic diagram

针对 GNSS-ReSAR 模式的发展，模型在输出端除可以输出传统的包含相干和非相干散射的 DDM 波形以外，还可以输出不同观测几何（GNSS-SAR 模式下）的双站雷达散射截面，同时模型的全极化计算功能将可以用于 GNSS-ReSAR 模式下的简缩极化特性的计算。针对陆地表面的典型水循环地物参数，通过该模型可以分析在 GNSS-ReSAR 模式下的裸土、地表冻融和植被覆盖土壤的 DDM 波形和双站雷达散射截面。模型的简缩极化功能通过全极化散射矩阵在与改进的 Stokes 矢量作用后，利用改进的 Stokes 矢量中的椭圆角 χ 和椭圆率角 ψ 的变化（公式 9），可以得到各种简缩极化的散射特性^[32]：

$$F_m = I_0 \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1 + \cos 2\psi \cos x) \\ \frac{1}{2}(1 - \cos 2\psi \cos 2x) \\ \sin 2\psi \cos 2x \\ \sin 2x \end{bmatrix} \quad (10)$$

针对北斗 GNSS 散射信号遥感，LAGRS 的简缩极化计算功能在于针对导航卫星发射的 RHCP，接收机端的信号极化状态可以随意改变，即可以计算 RR，LR，VR，HR 以及 $\pm 45^\circ$ R 等极化。而通过研究者前期的裸土和植被的仿真分析可以看出不同极化的散射特性，而 VR 极化和 HR 极化也在接收机有效接收范围内，但是简缩极化的散射特性随观测几何变化差异显著。

在 RR 极化的模型方面，研究者构建了三种新型极化 GNSS-R 反射率模型^[29]：Spec4PolR、SPM4Pol 和 Umich4Pol。推导了三种模型的整穆勒矩阵(Mueller matrix)表达式，并基于波合成技术(wave synthesis technique)计算 RR 极化反射率。Spec4PolR 仅采用穆勒矩阵中 3 个元素计算最终反射率，Umich4Pol 则需使用 5 个矩阵元素。SPM4Pol 基于全矩阵元素构建模型，实际计算中仅需选取 9 个核心元素。系统量化了各矩阵元素对土壤体积含水量(soil moisture content)的敏感性，并阐明其对 RR 极化反射率的贡献机制。Spec4Pol 因模型简化导致 RR 极化反射率与土壤含水量呈负相关（反射率随含水量增加而降低），此现象与实测数据存在矛盾。SPM4Pol 与 Umich4Pol 的模拟结果与实测数据吻合，其 RR 极化反射率随土壤含水量增加呈显著正相关。

利用 LAGRS 模型中的几何观测模块分析不同观测角度的结果示意图如图 9 所示。

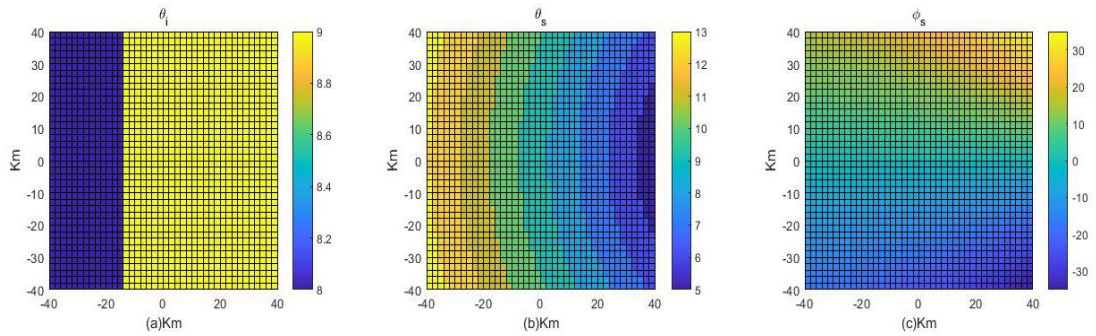


图 9 仿真模型中观测几何模块示意图

Fig.9 Schematic diagram of observation geometry module in simulation model

图 9 仿真时，轨道参数采用 GNSS 卫星信号的 GPS L1CA 码，GNSS 信号的发射功率为 13.4dBW.接收机码片间隔为 0.25chips,相干积分时间为 1ms。非相干积分次数为 1000 次，多普勒频率范围为 5000Hz，多普勒间隔为 500Hz.空间积分范围间隔均为 1000m。当发射机和接收机组的入射角为 8° 到 9° 范围内，对应的散射的天顶角范围在 5° 至 13° ，存在 9° 的差异。散射方位角动态变化范围在 70° 左右。图 10 以裸土在不同散射方位角的散射特性

为例，展示了裸土的简缩极化散射特性随散射方位角变化较大。然而，现有研究对于此类角度分布条件下的散射特性关注不足，导致观测数据的利用率较低。针对这一现状，未来发展的 GNSS-ReSAR 接收机将通过同步获取相干与非相干散射分量，实现对多观测几何条件下散射特性差异的有效捕获^[33]。

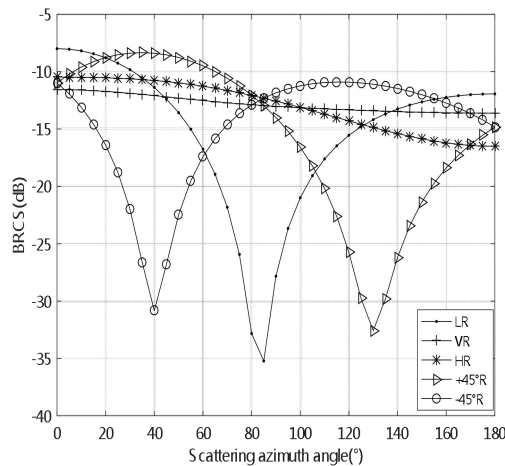


图 10 裸土简缩极化散射方位角双站雷达散射截面示意图^[32]

Fig.10 Schematic diagram of bare soil simplified polarization scattering azimuth dual station radar cross section

4 讨论及结论

在 GNSS-R 遥感技术用于地物参数反演的研究中，当前方法主要利用波形特征参数（包括峰值、前后沿及双站雷达散射截面 BRCS）开展反演。其中，基于镜面反射点有效反射率的反演方法已成为星载 GNSS-R 土壤水分反演的最有效手段。然而，当将 GNSS 系统作为机会照射源时，其与 GNSS-R 接收机构成的双站雷达系统具有动态特性——这种动态性源于 GNSS 信号源的时变特性。即使保持入射角恒定，该时变特性仍会导致散射天顶角与方位角随观测时间发生变化。通过 GNSS-R 正向建模中的延迟多普勒图（DDM）波形形成过程可知：不同地表特征在不同散射几何下的散射特性存在显著差异，观测区域积分网格内不仅包含镜面反射分量，还涉及非相干散射成分。当前单极化或双极化 DDM（GNSS-Re）模式在捕获不同观测几何下散射特性差异及极化特征方面存在局限性。为此，新一代 GNSS-R 载荷（GNSS-ReSAR）采用合成孔径雷达（SAR）模式，通过同步获取相干与非相干散射信息，实现对不同观测几何下地表目标散射特性的全面利用。此外，具备简缩极化能力的 GNSS-ReSAR 模式可提供包含极化维度和观测几何维度的多维数据。这种增强型数据集为开发独立反演算法及拓展可反演的地物参数奠定了重要基础，尤其对于依赖海量数据的人工智能（AI）反演算法而言，新增的极化与几何维度信息有助于深度挖掘地表目标散射特征中蕴含的物理信息。

参考文献

- [1] C. D. Hall and R. A. Cordey. Multistatic Scatterometry. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 'Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century. [1988] doi: 10.1109/IGARSS.1988.570200.
- [2] M. Martin-Neira. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS) application to ocean altimetry[J]. [1993-01-17].
- [3] J. Liu, L. Shao, and X. Zhang, et al. Advances in GNSS-R studies and key technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11):955-960.(刘经南,邵连军,张训械,等. GNSS-R 研究进展及其关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(11):955-960)
- [4] SMEX02 Experiment Plan, USDA, 2002. [Online]. Available: <http://hydrolab.arsusda.gov/smex02/smex60302.pdf>
- [5] Zavorotny V, Masters D, Gasiewski A, et al. Seasonal polarimetric measurements of soil moisture using tower-based GPS bistatic radar[C]//IGARSS 2003: 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings. Toulouse, France, 2003: 781-783 vol.2.
- [6] Rodriguez-Alvarez N, Camps A, Vall-Ilosera M, et al. Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 71-84. doi: 10.1109/TGRS.2010.2049023.
- [7] Motte E, Zribi M, Fanise P, et al. GLORI: A GNSS-R Dual Polarization Airborne Instrument for Land Surface Monitoring[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 732. doi:10.3390/s16050732.
- [8] Carreno-Luengo H, Ruf C S, Gleason S, et al. Latest Progress on Rongowai Polarimetric GNSS-R Airborne Mission[C]//IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024: 6828-6830.
- [9] Egido A, Paloscia S, Motte E, et al. Airborne GNSS-R Polarimetric Measurements for Soil Moisture and Above-Ground Biomass Estimation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(5): 1522-1532.
- [10] Gleason S, Unwin M. Sensing Ocean, Ice and Land Reflected Signals from Space: Results from the UK-DMC GPS Reflectometry Experiment[J]. ION GNSS, Long Beach, CA, 2005.
- [11] Unwin M, Jales P, Tye J, et al. Spaceborne GNSS-Reflectometry on TechDemoSat-1: Early Mission Operations and Exploitation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4525-4539.
- [12] Ruf C S, Coauthors. New Ocean Winds Satellite Mission to Probe Hurricanes and Tropical Convection[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97: 385-395.
- [13] Unwin M J, Pierdicca N, Cardellach E, et al. An Introduction to the HydroGNSS GNSS Reflectometry Remote Sensing Mission[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 6987-6999.
- [14] Zhao T, Shi J, Lv L, et al. Soil moisture experiment in the Luan River supporting new satellite mission opportunities[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111680.
- [15] Rodriguez-Alvarez N, Misra S, Morris M, et al. Sensitivity analysis of SMAP-reflectometry (SMAP-R) signals to vegetation water content[C]//2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Yokohama, Japan, 2019: 7395-7398.
- [16] Pierdicca N, Guerriero L, Giusto R, et al. SAVERS: A Simulator of GNSS Reflections From Bare and Vegetated Soils[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6542-6554.
- [17] Kurum M, Deshpande M, Joseph A T, et al. SCoBi-Veg: A Generalized Bistatic Scattering Model of Reflectometry From Vegetation for Signals of Opportunity Applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(2): 1049-1068.
- [18] Wu X R, Wang F. LAGRS-Veg: a spaceborne vegetation simulator for full polarization GNSS-reflectometry[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27.
- [19] Wu X, Ouyang X, Xia J, et al. LAGRS-Soil: A Full-Polarization GNSS-Reflectometry Model for Bare Soil Applications in FY-3E GNOS-R Payload[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15: 5296.
- [20] Wu X, Jin S, Ouyang X. A full-polarization GNSS-R Delay-Doppler-Map (DDM) simulator for bare soil freeze/thaw process detection[J]. *Geoscience Letters*, 2020, 7: 4.
- [21] Yang G, Du X, Huang L, et al. An Illustration of FY-3E GNOS-R for Global Soil Moisture Monitoring[J]. *Sensors*, 2023, 23: 5825.
- [22] Al-Khaldi M M, Johnson J T, O'Brien A J, et al. Time-Series Retrieval of Soil Moisture Using CYGNSS[J]. *IEEE Transactions on*

Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(7): 4322-4331.

[23] Chew C, Small E. Description of the UCAR/CU Soil Moisture Product[J]. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1558.

[24] Li Y, Yan S, Gong J. Target Detection and Location by Fusing Delay-Doppler Maps[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 1-14.

[25] X.Wu, J.C.Shi. An investigation into Compaq Hybrid Polarization GNSS-ReSAR remote sensing[J]. GNSS+R. 2025.

[26] Dassas K, Fanise P, Le Page M, et al. Polarimetric instrument Global Navigation Satellite System - Reflectometry airborne data[J]. Data in Brief, 2024, 52: 109850.

[27] Wu X. First-Time Soil Moisture Retrieval Using Single-Frequency Dual-Polarization GNSS-R with Airborne GLORI Data[EB/OL]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, (submitted for publication, Feb. 2025). [2025-02].

[28] Zavorotny V U, Voronovich A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 951-964.

[29] Wu X, Chen L, Shi J. Optimization of Random Surface Scattering Models for RR Polarization in SoOp-R/GNSS-R Applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 4890-4898.

[30] Munoz-Martin J F, Rodriguez-Alvarez N, Bosch-Lluis X, et al. Stokes Parameters Retrieval and Calibration of Hybrid Compact Polarimetric GNSS-R Signals[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-11.

[31] Wu X R, Xia J M, Bai W H, et al. A Novel Soil Moisture Retrieval Algorithm for FY-3E GNOS-R Leveraging Multi-Angle Observations[EB/OL]. [2024-03-12].

[32] Ulaby F T, Elachi C. Radar Polarimetry for Geoscience Applications[M]. Dedham, MA: Artech House, 1990.

[33] Wu X, Jin S. Models and Theoretical Analysis of SoOp Circular Polarization Bistatic Scattering for Random Rough Surface[J]. Remote Sensing, 2020, 12(9): 1506.